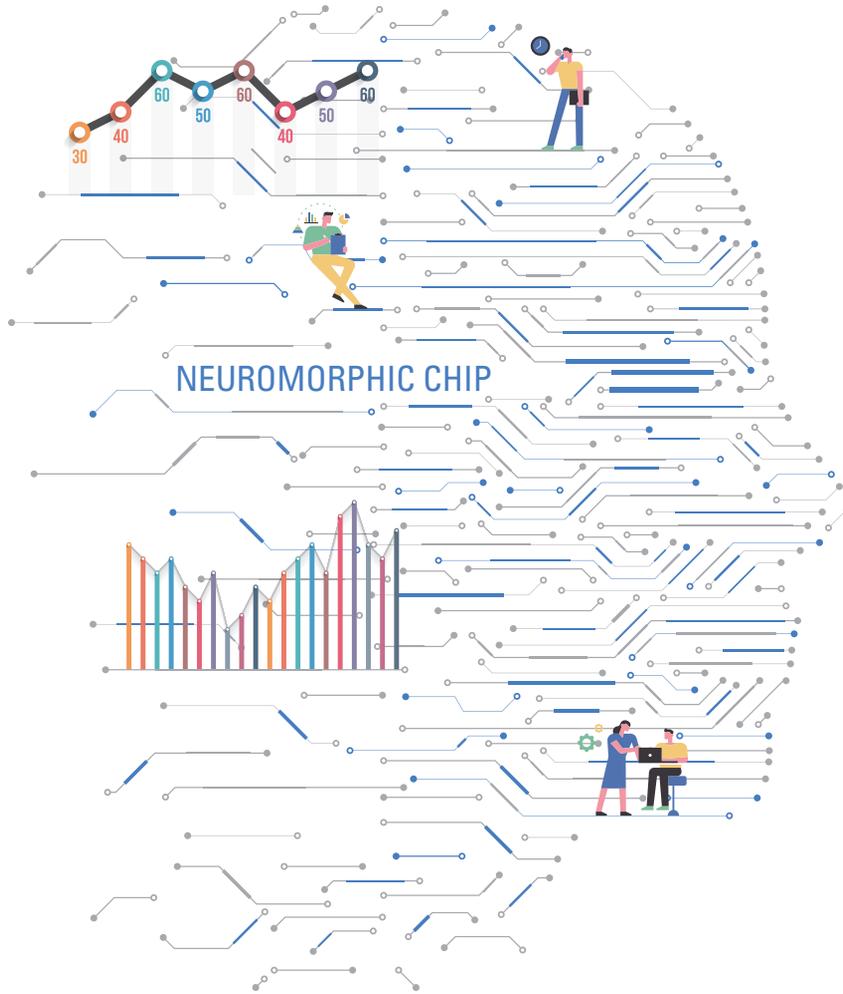


# 뉴로모픽칩

인간의 뇌를 담은 작은 반도체





# 뉴로모픽칩

인간의 뇌를 담은 작은 반도체

**펴낸곳**

한국과학기술한림원  
031)726-7900

**펴낸이**

한 민 구

**발행일**

2020년 9월

**홈페이지**

[www.kast.or.kr](http://www.kast.or.kr)

**기획·편집**

배승철 한국과학기술한림원 정책연구팀 팀장  
이동원 한국과학기술한림원 정책연구팀 주임  
조은영 한국과학기술한림원 정책연구팀 주임  
박주이 한국과학기술한림원 정책연구팀 주임

**콘텐츠**

조수현 스토리움 에디터·팀장

**디자인·인쇄**

경성문화사  
02)786-2999

---

이 보고서는 복권기금 및 과학기술진흥기금의 지원을 통해 제작되었으며,  
모든 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.



## 발간사

2018년, 한국과학기술한림원은 젊은 과학자들의 생각과 아이디어를 담은 정책제안서인 ‘차세대리포트’를 신설했다. 그간 발간된 차세대리포트를 통해 ‘젊은 과학자를 위한 R&D정책’, ‘과학자가 되고 싶은 나라를 만드는 방법’, ‘수소사회’, ‘양자기술’ 등의 주제에 대해 우수한 젊은 과학기술인 그룹인 ‘한국차세대과학기술한림원(Young Korean Academy of Science and Technology, Y-KAST)’ 회원들의 목소리를 담았다.

특히 ‘영아카데미, 한국과학의 더 나은 미래를 위한 엔진’을 주제로 발간된 차세대리포트 2018-04호에서는 Y-KAST로 모인 젊은 과학기술인들은 어떤 목적을 향해 무슨 일들을 해나가야 하는지에 대한 설문조사와 소규모 인터뷰를 진행한 바 있다. 흥미롭게도 이들은 성별, 지역, 전공분야에 상관없이 일치된 바람을 드러냈다. Y-KAST는 정부와 젊은 연구자들 사이의 통로로 기능해야 하며 차세대 회원들은 후속세대 양성에 대한 깊은 책임감으로 미래를 위한 나침반이 되어야 한다고 입을 모았다.

3주년을 맞이한 올해의 차세대리포트도 이들이 제시한 두 개의 목표를 향해 나아갈 수 있는 발판이 되기를 바란다. 미래 핵심기술의 연구개발 이슈와 함께 해당 분야에서 우리나라가 확실한 우위를 선점하기 위해서는 어떤 정책적 지원이 필요한지 살펴보고, 이공계 인재들이 진로를 선택하는 데 있어 도움이 될 만한 생생한 정보를 전달하고자 한다.

이번 차세대리포트 2020-01호에서는 인간의 두뇌 작동 방식을 모사하는 차세대 반도체 ‘뉴로모픽칩’에 대해 다루고자 한다. 정보 전달 과정의 병목현상과 과도한 전력소모의 구조적 한계를 가진 기존 반도체를 뛰어 넘어 21세기 인류의 새로운 대도약을 꿈꾸게 하고 있는 뉴로모픽칩을 살펴보고 해당 분야를 선도하기 위해 필요한 과학기술정책을 제시하는 등 현장에서 직접 연구하고 있는 젊은 과학자들의 생각과 아이디어를 담았다. 이들이 전하는 목소리가 개개인뿐만 아니라 국가의 미래를 치열하게 고민하는 청소년들과 정책입안자들에게 작은 빛이 될 수 있기를 기대한다.

2020년 9월  
한국과학기술한림원 원장  
한 민 구



## 함께해주신 분들



### 김수영

고려대학교 신소재공학부 교수

페로브스카이트 구조를 가진 유무기 할라이드 기반 저항변화 메모리 소자를 집중적으로 연구하고 있다. 뉴로모픽칩 구현에 필요한 기술적 요소들에 대해 이해하기 쉽게 설명하는 한편, 개발을 위한 각국의 경쟁 상황과 함께 향후의 사회경제적 변화에 대해 구체적인 전망을 소개했다.

### 이태우

서울대학교 재료공학부 교수

인공시각과 촉각 등 생체 모사 인공 신경에 대한 활발한 연구를 진행하고 있다. 인공지능과 뉴로모픽칩에 대한 기초적인 지식을 전달하고 이 분야에서 우리의 현위치를 설명한 뒤 국제무대를 선도하기 위해 나아가야 할 방향을 적극적으로 제안했다.



### 조정호

연세대학교 화공생명공학과 교수

유기소재 기반의 스마트 전자소자와 공정기술, 인공시냅스와 인공 뉴런 연구를 통해 사람의 신경계를 모사하는 인공신경망 개발에 주력하고 있다. 생체친화적인 뉴로모픽 소자의 가능성을 제시했으며 인공지능 시대의 신진연구자 육성에 대해 다양한 정책방향을 제시했다.



## 들어가기

### 포스트디지털 시대와 뉴로모픽 06

#### I

### 인공지능 시대를 향한 여정

- ① 뉴로모픽칩, 뇌를 담은 하나의 우주 10
- ② 새로운 우주를 위한 발걸음 13
- ③ 머리에서 발끝까지 16

#### II

### 이제 다시 대한민국의 시간

- ① 역돌출부의 전략적 활용 18
- ② 융합과 협력이 기초체력 21

## 포스트디지털 시대와 뉴로모픽

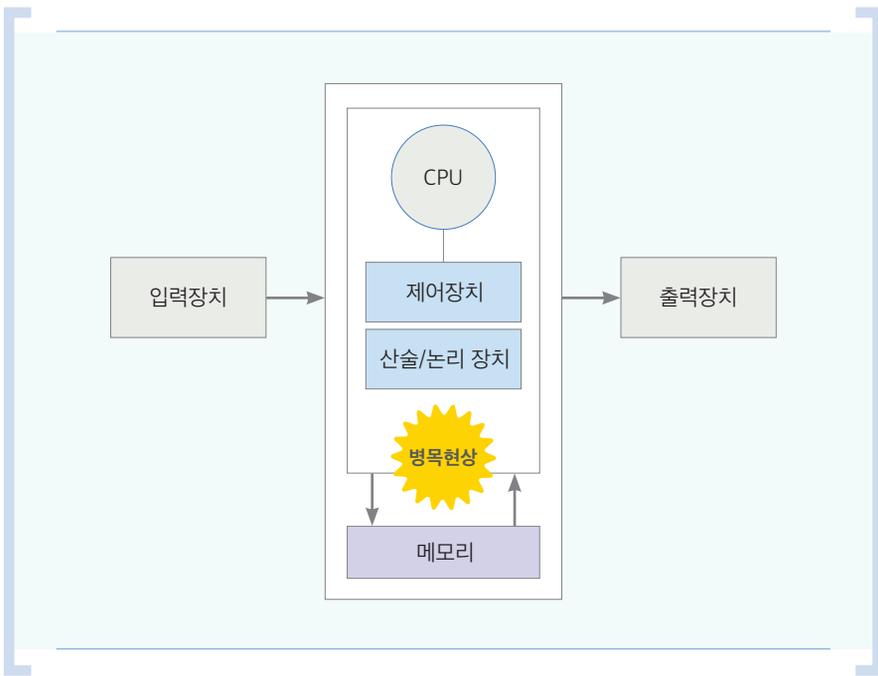


공중전화와 우체통이 자연스러웠던 1987년, 영화 ‘백투더퓨처’는 길거리에서 전자기기로 정보를 검색하고 메시지를 송수신하는 미래를 그렸다. 현재의 우리에게 너무도 평범한 일상이지만 당시의 영화 관람객들에게는 쉽게 믿기 힘든 영화 속 상상이었다. 자연 상태의 물질은 모두 도체 혹은 부도체 둘 중의 하나였던 고전역학의 틀을 깨고 전자들의 성질을 제어할 수 있게 된 반도체 기술은 단 30년 만에 세상을 디지털 기술로 물들이게 되었다.

2016년, 세계적인 반도체 대국으로 성장하며 지구촌 디지털 혁명을 이끈 한국은 또 다시 큰 충격과 마주했다. 이세돌과 알파고의 대결이다. 30년 전 영화의 관객들처럼 먼 미래로나 여기고 있던 인공지능이 국경 밖에서는 이미 빛의 속도로 현실화 되고 있음을 목도한 것이다. 이때의 각성은 우리나라가 모든 사회경제적 논의의 전면에 AI라는 화두를 전진배치하고 관련 기술 개발과 인프라 조성에 박차를 가하게 하는 분수령이 됐다.

그로부터 5년만인 2020년, 세계 최대의 첨단기술 전시회장인 CES(국제전자제품 박람회, International Consumer Electronics Show)는 가히 인공지능으로 시작해 인공지능으로 막을 내렸다 해도 과언이 아니다. ‘일상 속의 AI’라는 슬로건처럼 가전과 정보통신, 모빌리티, 바이오헬스, 스마트팜까지 거의 모든 산업 영역에서 AI를 앞세운 제품과 솔루션이 등장했다. 인류가 아이언맨의 인공지능 비서 자비스, 인터스텔라의 척척박사 로봇 타스와 함께 살아갈 날이 임박했음을 선언하는 자리나 마찬가지였다. 하지만 이런 장밋빛 전망이 현실화 되기 위해서는 아주 중요한 선결 조건이 있었다.

◆ ☆ 그림 1' 폰 노이만 구조 개념도



### 폰 노이만 구조의 한계

모든 사물이 연결되고 지능화되는 AI 시대의 도래를 위해서는 인공지능망 알고리즘 등의 소프트웨어뿐만 아니라 프로세서와 메모리, 센서 등 하드웨어의 뛰어난 성능이 필수적이다. 하지만 많은 이들은 전통적인 폰 노이만(Von neumann) 구조의 디지털 컴퓨팅은 이제 물리적 한계에 다다랐다고 말한다.

연산을 담당하는 CPU(중앙처리장치, Central Processing Unit)와 정보를 저장하는 메모리로 나누어 구성되는 폰 노이만 구조는 하드웨어의 재배치 없이 소프트웨어만의 교체를 통해 다양한 프로그램을 실행할 수 있다는 장점으로 현재 대부분의 컴퓨터 설계에 활용되고 있다. 하지만 이러한 방식에서는 연산장치와 저장장치가 별도로 존재하기 때문에 대규모의 정보를 처리할 경우 필연적으로 병목현상(bottleneck)이 발생하며, 이 과정에서 많은 전력이 소모되는 한계를 지닌다. 특히 이미지나 소리, 냄새, 촉각 같은 비정형 데이터를 처리하고 인간 수준의 인지·학습·추론·예측·판단 능력을 갖춘 인공지능의 본격적인 활용을 위해서는 더 큰 규모의 전력을 필요로 한다. 2016년 이세돌 9단과의 대국 당시 알파고는 1202개의 CPU와 176개의 GPU(그래픽처리장치, Graphics Processing Unit), 920테라바이트의 D램을 포함해 수많은 부품과 장비를 사용하였고, 방대한 시스템을 가동하는 데는 단순계산만으로 약 170kW의 전력이 필요했던 것으로 알려져 있다. 회로에서 발생하는 열 냉각장치까지 고려하면 실제 전력 소모량은 이보다 더 많았을 것이다. 이는 반도체 기술의 획기적인 혁신이 없이는 현재 인류가 공급할 수 있는 전력 수준으로 다가올 인공지능 시대를 감당하기 어렵다는 것을 말한다.

### 특이점이 온다

같은 시간 이세돌 9단의 두뇌는 ‘바둑을 둔다’는 동일한 활동을 하면서도 알파고가 소비한 전력의 0.01%인 20W의 전력밖에 소모하지 않았다. 이는 비단 천재기사만의 두뇌만이 아니라 인류 대부분에게 해당하는 사항이며 뉴로모픽(neuromorphic)칩 구상이 근본적으로 출발한 시작점이기도 하다. 뛰어난 인간 두뇌의 신경망(neuro)을 모사(morphic)해보자는 것이다.

범용 컴퓨터 구조인 ‘폰 노이만 구조’의 근간을 만든 20세기의 중요한 천재, 앨런 튜링(Alan Turing)과 존 폰 노이만(John von Neumann)은 디지털컴퓨터의 기본 이론을 넘어 인간처럼 사고하는 인공지능을 만들기 위해 뇌 구조 연구에 매달렸다. 안타깝게도 두 사람 모두 이른 나이에 불꽃 같은 생애를 마감했지만, 그들이 예고한 특이점(singularity)을 향해 인류의 행보는 계속되고 있다.



기술의 향구한 가속적 발전에 따라  
 인류 역사에는 필연적으로 특이점이 발생할 것이며,  
 이후의 인간의 삶은 지금껏 이어져온 것과는 전혀  
 다른 무언가가 될 것이다

- 존 폰 노이만

이번 차세대리포트에 참여하고 있는 3인의 차세대회원들은 인공지능 시대의 이정표가 될 ‘뉴로모픽칩’에 관한 논의와 함께, 그간 한국이 세계 시장을 주도해온 메모리 반도체와 달리 좀처럼 따라잡기 쉽지 않았던 시스템 반도체의 열세까지 단숨에 뒤집을 수 있는 새로운 컴퓨팅 패러다임의 도래에 대해 역설하고 있다. 이들의 전망과 해법을 담고 있는 다음의 내용들을 통해 포스트디지털 시대에도 선도자의 위치를 유지할 수 있는 길을 구체적으로 모색해보자.

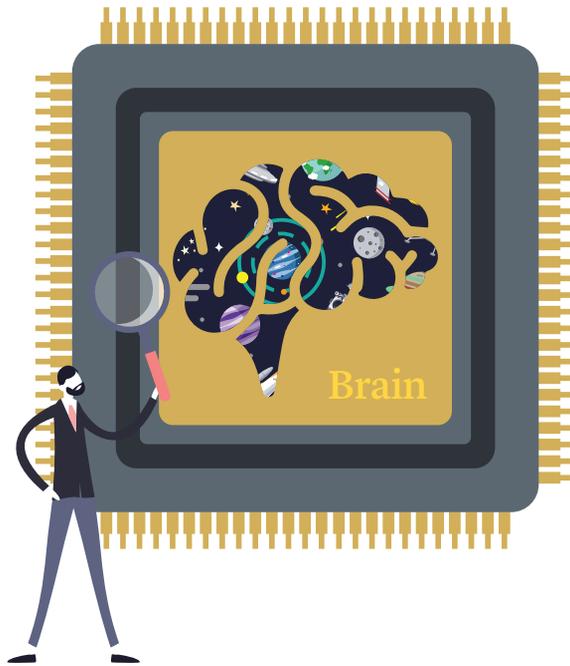


〈 전원버튼과 뉴로모픽칩 〉

$$| + \bigcirc = \text{Power Button Icon}$$

컴퓨터의 전원 버튼은 폰 노이만 구조에서 주로 사용되는 이진법을 상징하는 기호다. 2차세계대전 당시 튜링머신으로 암호를 해독했던 과학자들은 이진법을 응용해 전원 버튼의 ‘켜짐’은 1, ‘꺼짐’은 0으로 표시하기 시작했다. 훗날 국제전기표준회의(IEC)는 이 두 숫자들을 결합해 오늘날의 ‘전원’ 아이콘을 디자인했다. 뉴로모픽칩이 일반화되면 전원 버튼의 정의와 디자인은 완전히 달라질 수밖에 없다. 전력이 끊겨도 그 동안 회로에 흘렀던 모든 전자들의 양을 기억하는 이 초저전력 소자가 대중화되면 전원의 개념, 즉 부팅과 충전의 양상이 완전히 달라지기 때문이다. 컴퓨터는 배터리가 방전돼도 최종 작업 내용이 그대로 유지되고, 모바일 기기는 충전 없이 수개월을 사용할 수 있게 될 전망이다.

# 뉴로모픽칩, 뇌를 담은 하나의 우주

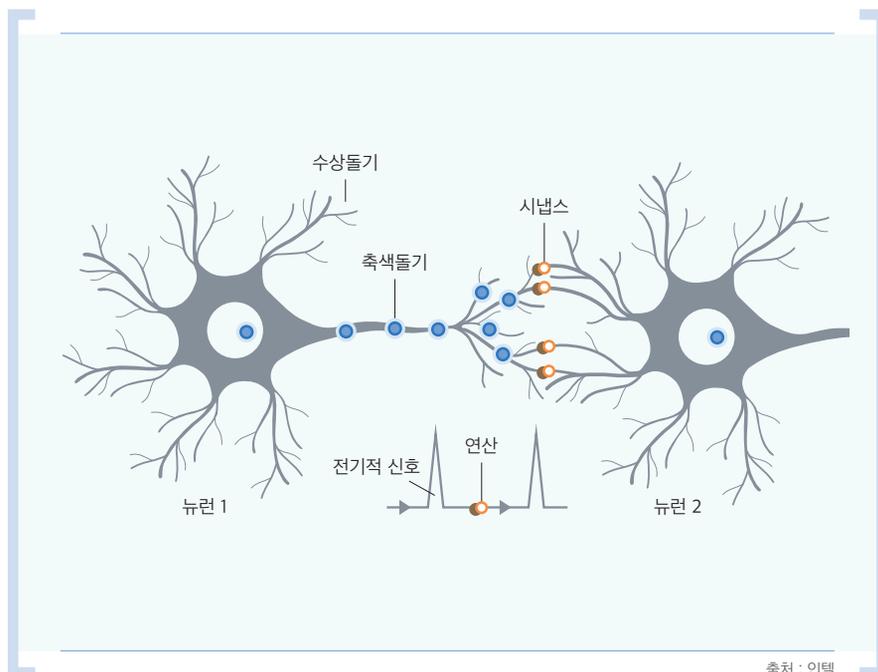


20세기의 마지막 10년은 인간의 '뇌'가 우주에 필적할 만큼 거대한 도전 과제로 부상한 시기이다. 1989년 '뇌의 10년'(Decade of the Brain)을 선포한 미국을 필두로 EU, 일본 등이 대규모로 재정을 투입하며 미지의 세계였던 뇌의 이해와 응용에 속도가 붙기 시작했다. 뉴로모픽의 개념 역시 이 시기에 등장한다. 뇌 과학의 발전으로 두뇌에 존재하는 뉴런과 시냅스의 신호전달 방식이 알려지고 트랜지스터의 동작 특성과 유사한 점들이 많다는 것을 알게 되면서 이를 반도체 기술로 구현하려는 움직임들이 일어나기 시작한 것이다.

공학자들의 관점에서 인간의 뇌는 매우 효율적이고 강력한 바이오컴퓨터이다. 약 1,000억 개의 뉴런과 이들 사이를 모든 방향으로 연결하는 100조 개 시냅스의 초병렬구조가 대량의 정보를 그 어떤 시스템보다 효율적이고 빠르게 처리한다. 눈을 통해 입력되는 방대하고 무질서한 시각 데이터 사이에서 패턴을 찾아내 빠르게 추상화 하며, 이를 통해 인간은 사물을 인지하고 구별할 수 있다. 코, 귀, 입, 피부 등의 다른 감각 기관 역시 마찬가지다. 음파의 패턴이나 화학물질 데이터 속에서 반복되는 패턴의 추상화를 통해 대상을 판별하기도 한다.

뉴런은 우리가 무언가를 보거나 듣거나 느끼거나 생각하면 이를 지속시간이 짧은 전기 신호인 스파이크(spike)로 만들어 다른 뉴런과 정보를 주고받는다. 시냅스는 이런 뉴런 간 정보 교환의 연결고리인데 전달 과정에서 시냅스의 이온 분포와 도파민, 세로토닌 등의 신호전달물질을 포획하는 리셉터(receptor) 농도가 변하며 학습과 기억이 동시에 진행된다. 일반적으로 뉴로모픽 시스템은 뉴런과 시냅스 소자로 구성되는데 특히 정보 전달의 핵심 과정을 담당하는 시냅스의 거동 모사 기술이 중요한 것도 이 때문이다.

#### ◆ ☆ 그림 2' 인간의 뇌를 구성하는 신경계 모식도



## I. 인공지능 시대를 향한 여정

또한 시냅스는 일을 많이 하는 뇌 부위에서는 연결이 증가하며, 상대적으로 일이 적은 부위에서는 연결이 감소하게 되는데 이것이 바로 저전력에도 대용량의 정보처리를 가능하게 하는 시냅스의 가소성(synaptic plasticity)이다. 시냅스는 기억 상태가 다양한 강도의 아날로그 형태로 변화하는 특성도 갖고 있다. 반복적인 학습과 경험에 따라 망각, 단기, 장기 등 여러 단계의 기억이 존재하게 되는 것이다. 따라서 시냅스의 기능을 모사하기 위해서는 기존에 0과 1만으로 이뤄진 디지털이 아니라 0과 1 사이 모든 값의 기억 특성을 가지는 아날로그 소자가 필요하다.

뉴로모픽 컴퓨팅은 사람의 뇌신경망처럼 뉴런과 시냅스로 구성된 뉴로모픽칩으로 인간의 두뇌 작동을 모사한다. 알고리즘의 각 명령어를 하나씩 처리하는 수많은 연산과정을 거쳐야 하는 딥러닝(가상의 인공신경망 소프트웨어를 기반으로 하는 머신러닝 방식, 차세대리포트 2019-01호 참조)은 뇌신경망의 전기적 상태들을 계산하고 모방하는 방대한 양의 사전 학습 데이터가 필요하기 때문에 에너지와 시간의 관점에서 볼 때 비효율적인 면이 있다.

하지만 뉴로모픽칩은 정보를 사건 단위로 받아들이며 이미지, 영상, 소리, 냄새 등 다양한 패턴의 데이터를 하나의 반도체에서 연산과 저장, 학습까지 동시다발적으로 신속하게 처리한다. 따라서 인간의 두뇌활동처럼 정답을 모르더라도 유사한 것들과 서로 다른 것들을 구분해서 군집을 만들어 스스로 학습해나갈 수 있다. 하드웨어의 혁신을 기반으로 하는 이러한 인공지능을 소프트웨어 기반의 DNN(Deep Neural Network)과 구분해 SNN(Spiking Neural Network)이라 부른다. DNN이 두뇌의 신경망을 지역적으로 흉내내는 것이라면, SNN은 비지도 학습이 가능한 신경망 그 자체를 만들어내려는 것이라 할 수 있다.

이러한 뉴로모픽 하드웨어는 자동차 첨단운전보조시스템, 실시간 얼굴 및 물체 인식, 실시간 문자 번역, 사물인터넷 센서를 시작으로 지능형 로봇, 무인기, 자율주행차, AI 비서 등 인공지능이 활용될 차세대 산업 전반에서 폭넓게 활용될 것으로 기대된다. 이와 관련하여 정보통신 분야 자문 기업인 가트너는 기술 분석을 통해 세계 뉴로모픽칩 시장은 2016년 12억 달러에서 2022년 약 48억 달러로 연평균 26.3%씩 성장할 것으로 전망하고 있다.

## 새로운 우주를 위한 발걸음



현재 뉴로모픽 시스템 기술은 실리콘 트랜지스터로 하드웨어를 구현하거나 멤리스터로 대표되는 차세대 소자를 CMOS(상보성금속산화물반도체, Complementary Metal Oxide Semi Conductor) 전자회로와 통합하는 방안의 두 가지 큰 줄기로 나뉜다. 초창기 뉴로모픽 기술은 기존에 많이 사용되던 CMOS 반도체 공정을 이용해 시냅스와 뉴런의 동작 특성을 표현하는 데 연구가 집중되었다. 하지만 CMOS 기반 뉴로모픽칩은 전력 소모를 많이 낮추지 못하고 회로의 크기 때문에 높은 집적도를 얻기 힘들어 최근에는 멤리스터 기반의 시냅스와 뉴런 소자 연구가 매우 활발하게 이뤄지고 있다.

‘멤리스터(memristor)’는 전력이 차단되기 이전의 상태를 모두 기억하는 메모리 소자이다. 멤리스터는 얼마나 많은 양의 전류가 통과했는지를 기억할 수 있는 수동소자로 전기가 끊겨도 그동안 회로에 흘렀던 전하의 양을 기억하고, 기억된 전하량에 따라 저항이 변화하는 특성을 가지고 있다. 뇌의 시냅스가 이전의 정보를 기억해서 그에 따라 반응하듯이 마지막에 경험한 자극을 기억해서 저항값이 달라지는 것이다.

## I. 인공지능 시대를 향한 여정

멤리스터가 더욱 흥미로운 것은 작아질수록 성능이 좋아진다는 것이다. 멤리스터를 통해 흐르는 전류의 값은 최초의 사이클로 되돌아갈 때 처음 상태로 돌아가지 못하고 그 이전의 이력변화에 따라 다른 값으로 돌아가게 된다. 이런 비선형적인 현상을 이용해 멤리스터는 강한 전도성 상태인 On과 약간의 전도성 상태인 Off 사이에서 양방향으로 미세하게 스위치를 조절할 수 있다. 이런 현상은 일반적인 마이크로 규모 크기의 칩보다 나노 수준에서 더 잘 나타난다.

멤리스터는 저항변화 방식에 따라 저항변화, 상 변화, 강유전체, 자기 저항 등으로 구분 되는데, 비휘발성 메모리인 저항변화 메모리(ReRAM, Resistive-switching Random Access Memory)는 전압에 따라 저항이 변하는 특성을 읽기(read)와 쓰기(write) 신호로 이용하는 소자로 기존 플래쉬 메모리보다 구동속도가 빠르고 낮은 전압으로도 작동한다는 장점으로 차세대 소자로 대두되고 있다. 그러나 주로 연구되어 온 금속산화물을 절연층으로 하는 저항변화 메모리는 절연층의 전기적 특성 제어가 어렵고 진공 장비를 이용해 제작 비용이 많이 들 뿐만 아니라 유연성을 가지기가 어렵다는 단점이 존재한다. 이에 할라이드 페로브스카이트 소재 기반 저항변화 메모리가 주목받고 있다.

태양전지와 발광다이오드에 많이 활용되는 유무기 하이브리드 페로브스카이트는 이력현상(hysteresis effect) 특성을 갖고 있다. 전압을 가하면 일순간 전압이 낮아지고, 에너지가 없어도 있는 것처럼 낮은 저항 상태를 유지하는 것이다. 이에 따라 10% 정도로 개시전압이 낮아 그만큼 더 저전력의 소자를 구현하는 데 유리하다. 또한 유기물 기반이라 유연성 부분에서도 활용도가 높다. 금속산화물 기반의 저항변화 메모리와 달리 진공 장비가 필요 없어 제작 비용 역시 저렴하다. 현재 국내에서는 친환경적인 비납 페로브스카이트와 습한 환경에서도 안정성이 높은 2차원 할라이드 페로브스카이트 기반 메모리의 연구가 활발히 진행되고 있다.

생체 시냅스와 유사한 수직 크로스바 형태의 2단자 소자가 아닌, 새로운 구조의 멤리스터에 대한 연구도 적극적으로 이뤄지고 있다. 크로스바 형태의 시냅스 어레이 구조는 집적도를 높일 수 있지만 전류 누설의 문제가 생길 수 있다. 이에 따라 스위치를 추가한 3단자 형태로 만들어 층을 쌓기도 한다. 시냅스에서 칼륨(K<sup>+</sup>), 나트륨(Na<sup>+</sup>)과 같은 이온들의 움직임에 따라 신호가 전달되는 것을 모사하는 3단자 이온성 시냅스 소자도 그런 경우다. 3단자 소자는 배수관과 밸브로 이뤄진 수도꼭지처럼 반도체 채널을 형성하는 2개의 단자와 이를 제어하는 1개의 게이트 단자로 구성된다. 게이트 단자에 전압을 가하게 되면 내부에 움직일 수 있는 이온을 다량 함유하고 있는 젤 형태의

고분자 층인, 이온 전도성 유전층에서 이온의 이동이 발생하고, 반도체 채널의 전도도를 변화시켜 전류의 흐름과 막힘을 제어한다. 움직이는 이온의 양을 통해 반도체 층에서 점진적으로 바뀌는 전류 상태를 만들 수 있어 아날로그 신호 처리가 가능한 것이다. 이온성 전해질 3단자 소자의 또 다른 장점은 낮은 구동 전압이다. 일반적인 3단자 소자의 구동에는 수십 볼트의 전압이 필요하다. 반면 이온을 움직이는 데는 높은 전압이 필요 없다. 일반적으로 이온성 전해질 3단자 소자의 구동은 1~3볼트의 전압만으로도 가능한 것으로 알려져 있다. 또한 소자 특유의 생체 적합성은 더욱 매력적인 특성이다. 키토산, 알부민 등의 생체친화적인 이온성 전해질 물질을 이용하면 장애와 질병 치료 등에도 활용될 것으로 기대되는만큼 인체 삽입용 뉴로모픽칩의 안전성을 더욱 높일 수 있다. 낮은 구동 전압은 전력 공급이 제한적인 생체이식 소자에도 매우 적합한 성질이 될 것으로 보인다.

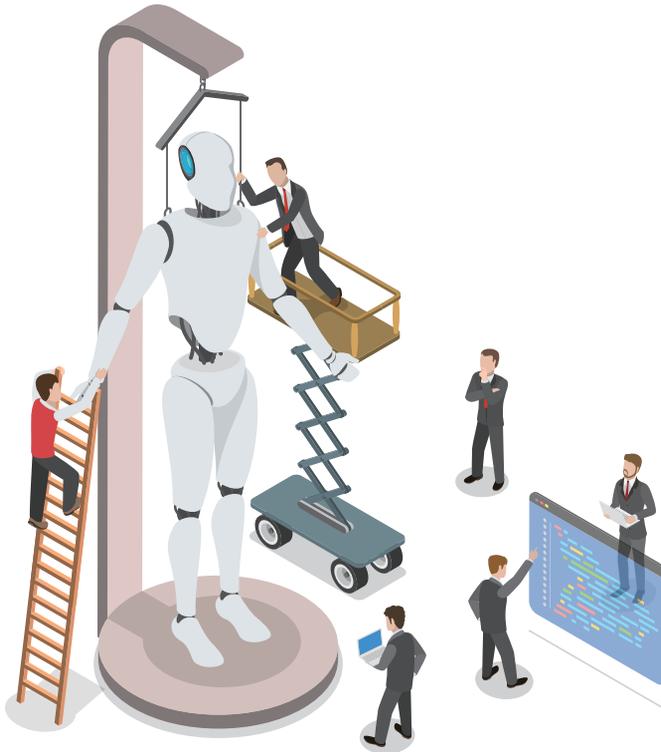


#### 〈 메모리스터(memristor) 〉

**memory** + **resistor** = **memristor**  
 기억                      저항                      메모리스터

1971년 미국 버클리대의 전기 엔지니어 레온 추아는 '메모리스터-잃어버린 회로소자'라는 논문에서 회로의 완벽한 구성을 위해 저항, 커패시터(콘덴서), 인덕터 다음의 4번째 소자를 추가했다. 그는 전하와 자기유동이 비선형적으로 연결되는 이 가상의 요소를 기억(memory)과 저항(resistor)의 합성어인 메모리스터로 이름 붙였다. 메모리스터의 존재가 증명되기까지는 40여 년이 필요했다. HP연구소의 과학자들은 실험을 통해 추아의 가설처럼 실제로 저항과 기억의 현상이 일어나는 새로운 종류의 소자를 만들어 2008년 네이처지에 '잃어버린 메모리스터의 발견'이란 논문으로 발표했다.

## 머리에서 발끝까지



인텔 뉴로모픽 컴퓨팅 연구소와 코넬대학교는 올해 3월, 1억 개의 뉴런을 갖춘 뉴로모픽 연구 시스템 포호йки 스프링스(Pohoiki Springs)를 이용한 전자코를 공개했다. 동물이 냄새를 맡을 때 뇌에서 일어나는 전기적 반응에서 알고리즘을 도출해 하드웨어 상으로 구현한 것이다. 테스트 결과 이 칩은 72개의 화학 감지센서를 이용해 아세톤, 암모니아, 메탄 등 10가지 냄새를 학습해 구별해 내는 데 성공했다. 이는 향후 뉴로모픽칩의 응용 분야에 대한 새로운 이정표를 제시했다. 인공지능과 차세대 컴퓨팅뿐만 아니라 의학과 화학 등의 발전사에서도 중요한 변수로 떠오를 가능성을 보여준 것이다.

하지만 이보다 앞선 지난 1월, 국내에서는 인공 시신경이 개발됐다. 인체 감각정보의

약 80%를 차지하는 시신경의 시냅스를 뉴로모픽 전자소자로 모사한 것이다. 이 인공 시신경은 실제 생체와 같이 특정 파장대역의 빛을 선택적으로 감지할 수 있는 신경소자이다. 이는 자외선광과 같이 인체에 매우 유해하지만 특정 조류나 곤충만 감지할 수 있던 파장 대역의 빛에 선택적으로 반응하도록 만들어져 이 소자를 이용하면 실시간으로 자외선 노출 정도를 조절하는 스마트 자외선 차단 시스템을 만들 수 있다. 또한 가시광선 영역에 한정되어 있던 인체의 시각도 확장할 수 있다. 빛 감응형 인공시각신경에 앞서 빛 감응형 감각·운동신경도 개발돼 고분자 엑츄에이터인 인공 근육을 생체와 같이 저전력으로 섬세하게 구동하는 데도 성공한 바 있다. 이렇게 생체와 같이 다양한 감각 신호를 처리하고 운동반응도 가능하게 할 수 있는 뉴로모픽칩은 인공망막, 전자피부, 신경보철, 생체센서 등 바이오헬스 산업 전반에서 인류의 새로운 진화를 이끌게 될 기대주로 관심을 모으고 있다. 인간처럼 사고할 뿐만 아니라 머리부터 발끝까지 사람과 꼭 닮은 소프트 로봇의 개발로도 확장될 가능성이 높다. 더 주목할 만한 부분은 뉴로모픽칩의 인체 활용 분야에서 우리나라가 선도적인 연구성과들을 도출하고 있다는 점이다. 생물의 촉각 신경을 모사하는 뉴로모픽 소자 개발에도 성공한 바 있으며 국제학술지 사이언스도 비중 있게 다룬 이 결과는 생체 피부의 촉각 수용체를 흉내 내는 압력 센서, 뉴런을 흉내 내는 유기 링오실레이터, 시냅스를 모방한 유기 트랜지스터로 구성된다. 인공 촉각 수용체로부터 전해지는 압력 정보가 인공 뉴런을 거치며 활동 전위로 바뀌고, 이런 여러 활동 전위들이 모여 인공 시냅스를 자극해 물체의 움직임 뿐만 아니라, 시각 장애인용 점자도 인식할 수 있었다.

뉴로모픽칩을 뇌에 이식해 치매 환자의 기억상실을 제어하거나 트라우마를 치료하는 ‘메모리 임플란트’ 기술도 국내에서 연구가 활발하다. 메모리 임플란트는 사람의 기억을 형성하는 데 중요한 역할을 하는 해마에 뉴로모픽칩을 이식해 기억력을 향상시키거나 유전자가위처럼 기억을 편집하는 기술이다. 해마는 세 가지 신경세포층으로 구성된 비교적 간단한 신경회로로 모든 감각신경 정보가 해마를 거쳐 저장·출력된다.

유기물을 이용한 뉴로모픽칩 연구에서도 역시 강점을 보이고 있다. 유기물질은 이용하면 생체 신경 모사 시스템의 설계를 간단하게 하거나 전력 소모를 줄일 수 있다. 또 유기 소자는 화학적으로 특성을 조절하기 용이하고, 인쇄 공정과 호환이 가능하여 대면적 시스템을 저가에 만들 수 있다. 또한 특유의 생체 적합성과 유연성 덕분에 생물체처럼 유연하고 안정적인 생물전자(bioelectronic) 기기를 만들 수 있다는 장점을 가진다. 이런 유기물 기반의 뉴로모픽칩 연구는 국제적으로도 선두권에 포진하고 있는 나노 기술과 함께 미래 바이오헬스 산업에서 큰 폭발력을 발휘할 가능성이 크다고 할 수 있다.

## 역돌출부의 전략적 활용

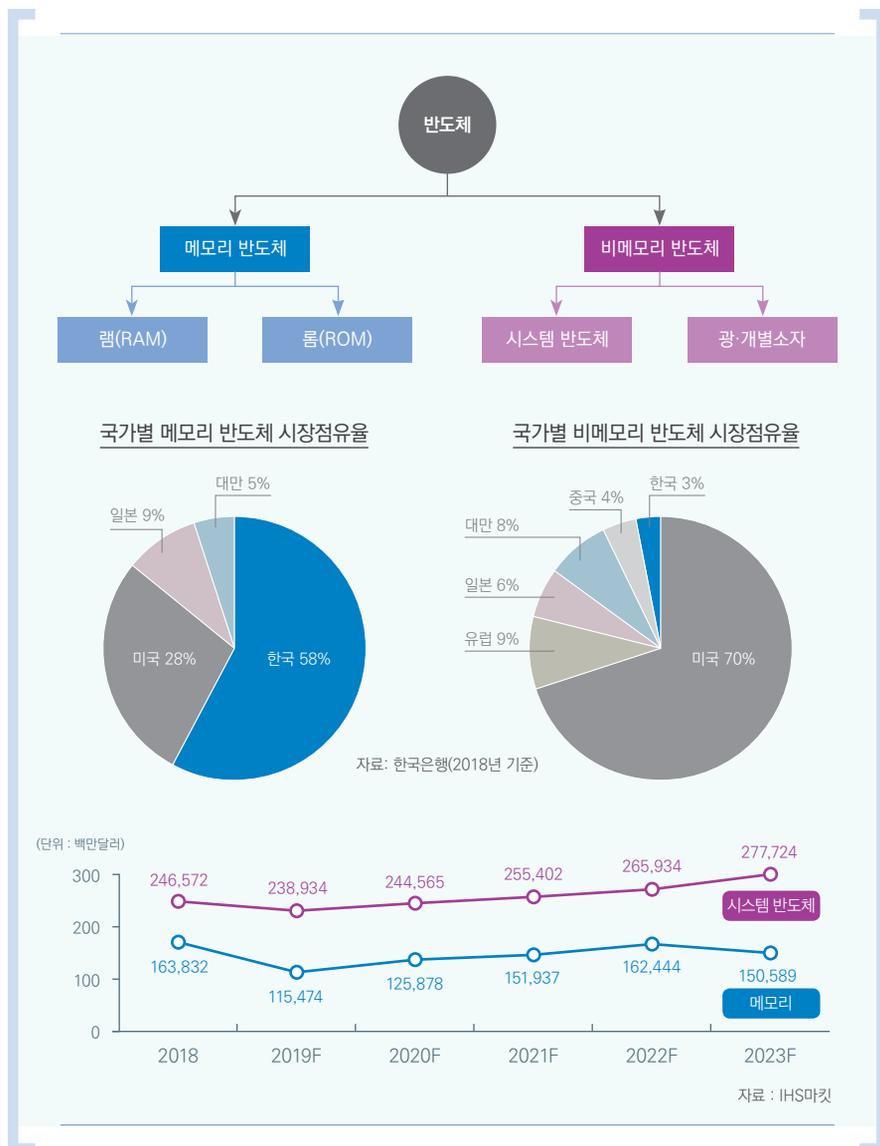


미국의 저명한 과학기술사가 토머스 휴즈는 <현대 미국의 기원 American Genesis>에서 세계대전, 포디즘, 맨해튼 프로젝트 등을 통한 과학기술의 발전이 어떻게 미국과 인류의 문명을 변화시켰는지를 ‘기술 시스템’(technological system)의 관점에서 설명하고 있다. 그의 기술 시스템 이론은 비단 기술 혁신이라는 부분적인 그림만으로 완성되지 않는다. 조직, 자원, 법과 제도, 환경 등과 유기적으로 상호작용해야만 구축될 수 있는 시스템이다. 휴즈에 따르면 기술 시스템은 통상적으로 발명→개발→혁신→이전→성장→경쟁→공고화의 단계를 거치며 전 사회적으로 확산된다. 물론 이 단계가 반드시 순서대로만 이뤄지는 것은 아니다. 서로 겹치거나 생략될 수 있으며, 종종 거꾸로 진행될 수도 있다. ‘역돌출부’(reverse salients)는 이런 기술 시스템의 진화 과정이 특정 문제로 인해 차질을 빚으며 지체되는 지점이다. 역돌출부는 원래 군사작전 용어로 아군 측을 향해 전선이 밀려 있는 영역을 뜻한다. 역돌출부가 깊숙하면 방어선이 길어지고 적에게 뿌리 부분을 절단당해 아군이 고립되기 쉽다. 이는 전선 전체에 걸쳐 심각한 문제를 야기하기 때문에 지휘관들은 역돌출부 제거에 군사력을 집중한다.

이런 역돌출부의 등장은 기술 시스템 발전의 큰 걸림돌이다. 하지만 이 문제를 어떻게 푸느냐, 또 누가 먼저 해결 능력을 확보하느냐에 따라 기술 시스템의 향후 진화 양상은 판이하게 달라진다. 역돌출부를 넘어서는 기술적 능력은 시스템으로 공고화되며 이 단계에 진입하면 더 이상 저항할 수 없는 지배적 위치를 점하게 된다.

최근 인공지능 기술 발전에 있어서는 '지능형 반도체'가 이런 역돌출부에 해당된다. 지능형 반도체가 제시하는 가치, 즉 비정형·대용량 데이터의 초저전력·초고속 처리가 실현되기 위해서는 기술뿐만 아니라 서비스, 표준, 규제 등 시스템 상의 다양한 보완 요소들이 필요하다.

◆ ✦ **그림 3'** 글로벌 반도체 시장 점유현황 및 전망



## II. 이제 다시 대한민국의 시간

지능형 반도체 개발이라는 난제를 해소할 수 있는 뉴로모픽칩의 기술적 능력뿐만 아니라 관련된 가치사슬 영역의 필요 요소들까지도 한 발 앞서 확보한다는 것은 인공지능 서비스를 중심으로 새롭게 재편되고 있는 전 세계 컴퓨팅 생태계의 판도를 좌우하는 새로운 시장 지배자로서의 등극 가능성을 의미한다.

익히 알려진 대로 우리나라의 반도체 산업은 표준 제품 중심의 범용 양산 시장인 메모리 분야에서 비약적인 성장을 이루어왔다. 2018년 기준 한국산 메모리 반도체의 시장 점유율은 58%에 달한다. 하지만 용도별 다품종 소량생산 구조의 비메모리 분야는 시장 규모가 메모리의 2배가 넘으며 특히 한국이 열세에 있는 시스템 반도체는 메모리와 비메모리를 합친 전체 반도체 시장에서 절반이 넘는 54%의 비중을 차지하고 있다. 일례로 스마트폰 원가에서 메모리 반도체 비중은 10~15%이지만 시스템 반도체의 비중은 약 40%이다. 시스템 반도체는 스마트폰, 디지털 가전, 서버, 자동차 등 시스템의 경쟁력을 결정하기 때문에 시황변화에 따라 가격이 크게 변동되는 메모리와 달리 안정적인 가격대를 유지하는 고부가가치 부품이다. 중국의 반도체 굴기와 비메모리 분야의 공급과잉 발생 가능성 속에 국내 주요 반도체 기업들 역시 시스템 반도체 시장 진출을 위해 노력하고 있지만 오랜 시간의 연구개발을 바탕으로 인력, 기술, 자본 등 시스템 반도체 시장의 아성을 쌓은 미국을 따라잡기가 쉽지 않았다. 그런데 뉴로모픽칩이란 게임체인저가 등장하면서 우리에게도 새로운 도전의 기회가 열리고 있는 것이다.

기존 기술에 해당하는 시스템 반도체의 경쟁력이 약한 우리나라가 신기술인 지능형 반도체 시장에서 앞서나가기 위해서는 관련 원천기술 개발과 동시에 기술의 최대 가치를 실현할 수 있도록 생태계 내의 선순환 구조를 구축해 가는 것이 중요하다. 지능형 반도체 개발을 선도하려면 하드웨어 분야뿐만 아니라 인공지능 서비스를 둘러싸고 있는 생태계가 유기적으로 연계되어야 하며, 인공지능 서비스가 최종적으로 소비자와 기업에게 전달되기까지 복잡한 가치사슬을 구성하고 있는 다양한 활동들이 함께 발전해야 하는 것이다. 따라서 기존 시스템 반도체가 지능형 반도체로 진화하는 경로에 대한 투자와 더불어 새로운 지능형 아키텍처 개발 경로를 지원하는 두 가지 경로에 대한 대비가 필요하다.

특히 소형화와 집적화를 넘어 4차산업혁명의 핵심기술들과 인간의 관계를 더욱 밀접하고 섬세하게 연결하게 될 뉴로모픽칩의 개발은 보다 특별한 관심과 지원의 대상이 되어야 할 필요가 있다. 미래를 위한 투자가 없다면 곧 다가올 새로운 기술 시스템 패권 전쟁에서 한국은 다시 종속변수에 머물 수밖에 없다.

## 융합과 협력이 기초체력



뉴로모픽칩 관련 연구개발은 현재 두드러진 선두 그룹이 없는 가운데 모든 나라가 동일 출발선상에 서 있다고 봐도 무방하다. 하지만 ‘융합과 협력의 전통’이란 기초체력의 관점에서 보자면 현격한 차이가 나는 만큼 선천적으로 불리한 조건을 극복하기 위한 노력이 동반되어야 한다.

국내 뉴로모픽칩 개발자들의 공통된 의견 중 하나는 뇌과학과 뉴로모픽 공학의 연구를 병행해야 한다는 것이다. 인간 신경회로의 데이터 처리에 대한 시스템 수준에서의 이해가 여전히 부족한 상황에서 두 가지 모두를 연구자 한 사람이 해결하는 것은 분명히 무리다. 뉴로모픽칩 개발은 소자와 재료라는 제한된 영역만의 일이 아니다. 뇌과학을 중심으로 이학과 공학 분야 전반의 참여 없이는 실현 불가능한 과제다.

융합은 어떻게 보면 새로운 것이 아니다. 물리학이 전자공학을, 뇌 과학이 뉴로모픽 공학을 탄생시킨 것처럼 특별한 목적성에 기초해 다양한 지식이 모이고 쌓이다 보면 자연스럽게 융합이 일어나게 된다. 따라서 전례가 없던 뉴로모픽칩 개발을 위해서는 사람과 지식을 모이게 할 다양한 융합연구 과제도 적극적으로 고려되어야 한다. 이러한 융합연구 과제는 ‘하이리스크 하이리턴’의 영역이다. 실패의 가능성도 있지만 성공한다면 큰 부가가치와 함께 실제로 국민이 체감할 수 있는 섬세한 기술과 서비스를 탄생시킬 수 있다.

## II. 이제 다시 대한민국의 시간

한편 현재 해외의 글로벌 기업과 연구소, 대학들은 정부의 적극적인 지원 속에 단일 소자 차원의 재료 연구에서부터 뉴로모픽칩을 실제로 구현할 시스템 레벨까지 유기적이고 전방위적인 공동 연구를 진행하고 있다. 이들 간의 정보 공유와 이해는 향후 뉴로모픽칩 개발에서도 차원이 다른 경쟁력으로 발현될 것이 분명하다.

반면 국내 상황은 대학과 연구소 단위의 소자 연구는 활발하지만 이를 산업체 수준에서 검증할 수 있는 협력체계가 아쉬운 상황이다. 특히 경쟁력 있는 팹리스(fabless, 반도체 제조 공정 중 설계와 개발을 전문화한 회사) 기업이 극소수란 점이 큰 약점이다. 따라서 정부는 산학연 협력과제와 함께 정부출연연구기관 등이 보유하고 있는 장비와 산업체 양산시설에 대한 정확한 현황 진단과 운영의 효율성 제고를 통해 대학이 보유한 연구개발 역량과 상호보완적으로 작동될 수 있도록 오픈웨어 연구 인프라를 구축할 필요가 있다.

또한 융합 지식과 경험의 축적을 위한 국가적 자산과 역량의 대규모 투입이 충분한 결실로 이어지기 위해서는 단발성 투자로만 끝나서는 안 되며 꾸준한 후속 과제가 뒷받침되어야 한다. 과제 선정 이후도 중요하다. 중간 단계에서 진행되는 평가를 위한 평가 대신, 지속적인 컨설팅을 통해서 융합 연구에 참여하는 연구자 모두가 스스로의 목표에 이를 수 있도록 정성적으로 관리되어야 할 필요가 있다. 또한 여기서 말하는 관심과 노력은 비단 정부에게만 해당되는 이야기가 아니다. 종합반도체기업이 일괄공정으로 만들 수 있는 메모리 반도체와 달리, 시스템 반도체는 팹리스, 파운드리, 패키징, 테스트 등 분야별 전문기업들 간의 전략적인 협업이 필수적이다. 뉴로모픽칩 역시 어느 한 연구자만의 탁월함으로 해결할 수 있는 과제가 아니다. 융합과 협력의 시너지를 배가하기 위해서는 폐쇄적이고 경쟁적인 연구 문화가 아닌, 현명하고 효과적인 상생의 정신이 깃든 우리의 연구문화를 만들어가야 할 것이다.

N E U R O M O R P H I C C H I P

뉴 로 모 픽 칩 ,  
뇌 를 담 은 하 나 의 우 주



## 참고 문헌

- 광영직(2018), 물리산책, 네이버캐스트
- 김범준(2019), 김범준의 옆집 물리학, 경향신문
- 김상욱(2018), “떨림과 울림”, 동아시아
- 김영훈(2019), 알아두면 쓸모 있는 양자역학 이야기, 삼성디스플레이 뉴스룸
- 김재영(2018), 양자역학, 네이버캐스트
- 김재완(2018), 난공불락 양자암호에 도전하다, 네이버캐스트
- 김정언 외(2018), 지능형반도체 기술개발을 위한 기획 연구, 정보통신정책연구원
- 김진태(2014), 10년 후의 물리학, 물리학과 첨단기술 2014년 4월호, 물리학회
- 미치오 가쿠(2012), 미래의 물리학, 김영사
- 박 권(2019), 믿기 힘든 양자, 고등과학원 웹진
- 볼프강 바우어, 게리 웨스트폴(2011), 현대 대학물리학2, 교보문고
- 신용일(2014), 양자물성 연구를 위한 극저온 원자기체 실험기술, 광학과 기술 18권 1호
- 양범정(2016), 디락/바일 준금속의 분류, 물리학과 첨단기술 2016년 5월호, 물리학회
- 에른스트 페터 피셔(2010), “막스 플랑크 평전”, 김영사
- 유재준(2016), “호기심의 과학”, 계단
- 이강영(2016), 불멸의 원자, 사이언스북스
- 이현정·최만수(2011), 위상절연체의 응용 및 위상양자컴퓨터, 물리학과 첨단기술 2011년 3월호, 물리학회
- 임경순(2001), “현대물리학의 선구자”, 다산출판사
- 임재호(2018), 쉽게 알아보는 양자역학, 삼성디스플레이 뉴스룸
- 정선양(1996), 새로운 방향의 모색 및 독일 막스플랑크연구회의 경험, 한국연구재단 정책학회보
- 정지형 외(2019), 빛의 속도로 계산하는 꿈의 컴퓨터, 양자컴퓨터, 한국과학기술기획평가원, KISTEP Issue Paper 2019-07, Vol. 265
- 최무영(2008), “최무영 교수의 물리학 강의”, 책갈피
- 한정훈(2011), 위상 절연체: 요약과 전망, 물리학과 첨단기술 2011년 3월호, 물리학회

---

## 차세대리포트

2018 젊은 과학자들을 위한 R&D 정책은 무엇인가(上)

젊은 과학자들을 위한 R&D 정책은 무엇인가(下)

과학자가 되고 싶은 나라를 만드는 방법

영아카데미, 한국 과학의 더 나은 미래를 위한 엔진

10년 후 더 건강한 한국인을 위해 필요한 과학기술은 무엇인가?

2019 머신러닝, 인간처럼 보고 생각하고 예측하라

수소사회, 과학기술이 만들어가는 미래

양자기술, 과학은 끝없이 증명할 뿐이다

---

## 한국과학기술한림원은,

대한민국 과학기술분야를 대표하는 석학단체로서 1994년 설립되었습니다. 1,000여 명의 과학기술분야 석학들이 한국과학기술한림원의 회원이며, 각 회원의 지식과 역량을 결집하여 과학기술 발전에 기여하고자 노력해오고 있습니다. 그 일환으로 기초과학연구의 진흥기반 조성, 우수한 과학기술인의 발굴 및 활용 그리고 정책자문 관련 사업과 활동을 펼쳐오고 있습니다.

---

## 한림석학정책연구는,

우리나라의 중장기적 과학기술정책 및 과학기술분야 주요 현안에 대한 정책자문 사업으로 한국과학기술한림원 회원들이 직접 참여함으로써 과학기술분야 및 관련분야 전문가들의 식견을 담고 있습니다.

한림석학정책연구는 한림연구보고서, 차세대리포트 등 다양한 형태로 이루어지고 있으며 국회, 정부 등 정책 수요자와 국민들에게 필요한 정보와 지식을 전달하기 위하여 꾸준히 노력하고 있습니다.

---

## 한국과학기술한림원 더 알아보기

 홈페이지  
[www.kast.or.kr](http://www.kast.or.kr)

 블로그  
[kast.tistory.com](http://kast.tistory.com)

 포스트  
[post.naver.com/kast1994](http://post.naver.com/kast1994)

 페이스북  
[www.facebook.com/kastnews](http://www.facebook.com/kastnews)



---

이 사업은 복권기금 및 과학기술진흥기금 지원을 통한 사업으로 우리나라의 사회적 가치 증진에 기여하고 있습니다.



**KAST** 한국과학기술원  
*The Korean Academy of Science and Technology*

(13630) 경기도 성남시 분당구 돌마로 42  
Tel 031-726-7900 Fax 031-726-7909 E-mail [kast@kast.or.kr](mailto:kast@kast.or.kr)

